Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 5, Dec.-Jan. 2021, p. 627-643

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۵، آذر – دی ۱۴۰۰، ص. ۶۴۳-۶۲۷

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* Mill.) تحت شرایط تنش خشکی: ۲- شبیه‌سازی بهره‌وری آب، زیست‌توده و عملکرد

اسماعیل فرخی[۱]- مهدی نصیری محلاتی[۲*]- علیرضا کوچکی[۳]- سید علیرضا بهشتی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷

چکیده

پیش‌بینی عملکرد محصول با هدف بهینه کردن میزان آب آبیاری به خصوص هنگامی که آب قابل دسترس محدود باشد، برای افزایش پایداری در تولید بسیار حائز اهمیت است. در این مطالعه مدل آب محورِ آکوواکراپ که توسط فائو توسعه داده شده است، به منظور شبیه‌سازی بهره‌وری آب، زیست توده و عملکرد گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری واسنجی و صحت‌سنجی شد. آزمایش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در دو سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ اجرا شد. واسنجی مدل با استفاده از داده‌های سال ۱۳۹۵ و صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های سال ۱۳۹۶ انجام شد. در این مطالعه مدل آکوواکراپ تحت شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) و کم آبیاری (۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی) اجرا و در دو مرحله رویشی و زایشی برای محصول گوجه‌فرنگی واسنجی و صحت‌سنجی شد. کارایی مدل با استفاده از میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب تعیین (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل آکوواکراپ به منظور شبیه‌سازی بهره‌وری آب، زیست‌توده بالای سطح خاک و عملکرد خشک میوه گوجه‌فرنگی برای همه تیمارهای آبیاری به‌ترتیب با مقادیر شاخص‌های آماری NRMSE=٪۱۴/۸۱، d=۰/۸۵، R^2=۰/۹۳، ٪۷/۴<NRMSE<٪۲۳، ۰/۹۴<d<۱، ۰/۹۲<R^2<۰/۹۹ و NRMSE=٪۹/۹۷، d=۰/۹۶، R^2=۰/۸۶ واسنجی شد. در طول مرحله صحت‌سنجی، NRMSE=٪۱۳/۶۴، d=۰/۹۰، R^2=۰/۲۳، ٪۶/۵<NRMSE<٪۲۱/۳، ۰/۹۵<d<۱، ۰/۹۲<R^2<۰/۹۸ و NRMSE=٪۱۵/۶۴، d=۰/۹۵، R^2=۰/۹۵ به‌ترتیب برای بهره‌وری آب، زیست توده بالای سطح خاک و عملکرد خشک میوه گوجه‌فرنگی بدست آمد. به طور کلی توانایی مدل آکوواکراپ در شبیه‌سازی مقادیر بهره‌وری آب، زیست‌توده بالای سطح خاک و عملکرد مشاهده شده رضایت‌بخش بود، با این وجود کارایی مدل با افزایش تنش آب کاهش پیدا کرد.

واژه‌های کلیدی: آکوواکراپ، مرحله رویشی و زایشی، کم آبیاری، مدل‌سازی، بهره‌وری آب

مقدمه

یکی از چالش‌های واقعی در بخش کشاورزی کاهش مصرف آب و در عین حال تأمین تغذیه مورد نیاز جمعیت رو به رشد جهان می‌باشد. بدون اقدام‌های مؤثر جهت بهبود کارایی، پیش‌بینی می‌شود که مصرف آب کشاورزی تا سال ۲۰۵۰ حدود ۲۰ درصد افزایش یابد (۲۸) و یا به عبارت دیگر جهان تا سال ۲۰۳۰ با کمبود ۴۰ درصدی آب مواجه شود (۲۷). با توجه به نیاز آبی بالای گوجه‌فرنگی دارد (۱۶، ۱۷ و ۱۸) و به دلیل اینکه آب یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی تأثیرگذار بر رشد و تولید گیاه می‌باشد، برنامه‌ریزی آبیاری برای افزایش عملکرد کمی و کیفی گوجه‌فرنگی بسیار مهم است (۲۶). رشد و نمو گیاه گوجه‌فرنگی بویژه در شرایط تنش آبی، پدیده‌ای بسیار پیچیده است، بنابراین مدل‌های شبیه‌سازی موقعیت بسیار مناسبی ایجاد می‌کنند تا در پیش‌بینی و توضیح رفتار چنین سیستم پیچیده و پویایی که رشد گیاه را توصیف می‌کند به عنوان ابزارهای قدرتمندی عمل کنند (۱۱).

آکوواکراپ مدلی است چند گیاهی که عملکرد انواع گیاهان زراعی یکساله را در شرایط مختلف مدیریتی و فیزیولوژیکی در واکنش به محدودیت آب شبیه‌سازی می‌کند (۲۰ و ۲۲). آکوواکراپ

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استادان، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: (Email: mnassiri@um.ac.ir
۴- دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی
DOI: 10.22067/JSW.2021.15035.0

اثرات پویای طیف وسیعی از تنش‌های محیطی، به‌ویژه تنش‌های آبی و دمایی، را بر رشد گیاه محاسبه می‌کند و تأثیر غلظت دی‌اکسید کربن جو بر بهره‌وری آب زراعی را مد نظر قرار می‌دهد. اثرات تنش‌های ناشی از عناصر غذایی و شوری خاک نیز به طور غیر مستقیم با واسنجی مدل برای تولید زیست‌توده در شرایط متفاوت حاصلخیزی و شوری منطقه مورد بررسی در نظر گرفته می‌شود (۸).

رابطه بین عملکرد محصول زراعی و آب که در مدل آکوواکراپ استفاده شده است (۴)، بوسیله رابطه ساده‌ای توصیف می‌شود که در آن کاهش عملکرد نسبی با کاهش نسبی متناظر در تبخیر و تعرق مرتبط است (رابطه ۱).

$$\left(1-\frac{Y_a}{Y_x}\right)=K_y\left(1-\frac{ET_a}{ET_x}\right)$$ رابطه ۱

که در این رابطه Y_a و Y_x به ترتیب عملکرد واقعی و حداکثر (ton/ha)، $(1\text{-}Y_a/Y_x)$ کاهش عملکرد نسبی، ET_a و ET_x به ترتیب تبخیر و تعرق واقعی و حداکثر (mm)، $(1\text{-}ET_a/ET_x)$ تنش نسبی آب و K_y ضریب پاسخ عملکرد[1] (ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی در تبخیر و تعرق) می‌باشند. ضریب پاسخ عملکرد (K_y) مجموعه‌ای از روابط پیچیده بین تولید و مصرف آب توسط گیاه است که بسیاری از فرآیندهای بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی در آن دخیل هستند (۱۳).

چندین آزمایش با مدل آکوواکراپ به منظور بررسی شبیه‌سازی کم آبیاری و عملکرد محصول در پاسخ به اعمال تنش‌های مختلف آبی در مناطق وسیعی از جهان انجام شده است. آرایا و همکاران (۲) از آکوواکراپ به منظور بهبود مصرف آب محصول در شرق آفریقا، احمدی و همکاران (۱) به منظور بررسی رشد گیاه و محتوی آب خاک تحت مدیریت‌های آبیاری مختلف در جنوب ایران، گریوس و وانگ (۹) برای ارزیابی استراتژی‌های مدیریتی در آبیاری با هدف بهبود مصرف آب کشاورزی در جنوب تایوان و پاوار و همکاران (۱۹) برای بررسی بهبود بهره‌وری آب استراتژی‌های مختلف آبیاری در هند، استفاده کردند.

بسیاری از مطالعات نیز لزوم آزمایش‌های بیشتر به منظور واسنجی پارامترهای کلیدی در شرایط متنوع اقلیمی، خاکی، زراعی، آبیاری و مدیریت‌های مزرعه‌ای پیشنهاد داده‌اند (۱۲، ۱۰، ۲۳ و ۱۴). کاترجی و همکاران (۱۴) نشان دادند که مدل آکوواکراپ توانست زیست‌توده نهایی و عملکرد گوجه‌فرنگی را در شرایط بدون تنش آب و تنش متوسط آب به خوبی شبیه‌سازی کند، این در حالی است که شبیه‌سازی عملکرد در شرایط تنش شدید آب ضعیف گزارش شد. رشد و نمو گیاه گوجه‌فرنگی پدیده‌ای بسیار پیچیده است (۱۱) به خصوص زمانی که تحت تأثیر مسئله پیچیده تنش آبی نیز قرار بگیرد.

ارقام رشد نامحدود گوجه‌فرنگی به دلیل پیچیدگی‌های رشد و نموی، کمتر مورد توجه محققان مدلسازی قرار گرفته است و اکثر مطالعات انجام گرفته بر روی گوجه‌فرنگی در جهان، در مورد گوجه‌فرنگی‌های مخصوص فرآوری می‌باشد که ویژگی مهم آن‌ها این است که تنها یک بار آن هم با دستگاه مکانیزه، برداشت صورت می‌گیرد. از طرفی تاکنون مطالعه‌ای به منظور شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی در ایران صورت نگرفته است. بنابراین هدف از مطالعه حاضر شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی با تمرکز بر شبیه‌سازی بهره‌وری آب، زیست‌توده و عملکرد آن با استفاده از مدل آکوواکراپ تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل آکوواکراپ

از همان مسیری که تعرق صورت می‌گیرد، دی‌اکسیدکربنی که از طریق فتوسنتز به کربوهیدرات‌ها تبدیل می‌شود نیز توسط گیاه جذب می‌شود، از اینرو میزان تعرق با تولید زیست‌توده متناسب است (۲۲ و ۲۵). رابطه بین زیست‌توده تولید شده و آب مصرف شده توسط یک گونه خاص گیاهی برای شرایط خاص آب و هوایی مشخص به صورت خطی است، از اینرو آکوواکراپ به منظور شبیه‌سازی زیست‌توده از نوعی تابع بهره‌وری آب گیاه نرمال‌شده (ماده خشک تولید شده بالای سطح زمین در واحد سطح زمین یا در واحد میزان آب تعرق‌یافته (میلی متر)) استفاده می‌کند. این رابطه، هسته مدل آکوواکراپ را تشکیل می‌دهد و از اینروست که آکوواکراپ را مدلی آب محور می‌نامند. بنابراین به منظور شبیه‌سازی زیست‌توده از رابطه (۲) استفاده می‌شود (۲۲ و ۲۵):

$$B=WP\cdot\Sigma Tr$$ رابطه (۲)

که در آن B زیست‌توده بالای سطح خاک (کیلوگرم در متر مربع)، WP بهره‌وری آب نرمال‌شده (کیلوگرم در متر مربع) و Tr (میلی‌متر) تعرق گیاه می‌باشد.

آکوواکراپ به منظور محاسبه عملکرد، از شاخص برداشتِ (HI) تنظیم شده با توجه به زمانِ تنش در شروع تشکیل محصول، در طول گلدهی و هنگام تشکیل عملکرد، استفاده می‌کند (۲۲ و ۲۵). رابطه ۳ محاسبه عملکرد توسط آکوواکراپ را بیان می‌کند.

$$Y=f_{HI}\,HI_o\,B$$ رابطه (۳)

در این رابطه Y عملکرد (کیلوگرم در متر مربع)، HI_o شاخص برداشت مرجع، B زیست‌توده بالای سطح خاک (کیلوگرم در متر مربع) و f_{HI} ضریبی است که اثر تنش‌ها را مدنظر قرار می‌دهد و شاخص برداشت را نسبت به مقدار مرجع خودش تنظیم می‌کند. تنظیم شاخص برداشت به زمان و شدت تنش کمبود آب و دمای هوا در طول دوره رشد بستگی دارد. تأثیر تنش بر شاخص برداشت

1- Yield response factor

می‌تواند مثبت ($f_{HI} > 1$) یا منفی ($f_{HI} < 1$) باشد.

آکوواکراپ تنها به تعداد کمی داده‌های ورودی نیاز دارد که این داده‌ها نیز به سادگی قابل دستیابی هستند. پارامترهای مورد نیاز مدل شامل پارامترهای آب و هوایی، گیاهی، خاکی، مدیریت مزرعه، آب زیرزمینی، عمق حداقل ریشه مؤثر و عمق اولیه آب خاک یا محتوای آب خاک می‌باشد. متغیرهای آب و هوایی شامل حداکثر و حداقل دمای هوا، بارندگی، غلظت دی‌اکسیدکربن جو و تبخیر و تعرق مرجع (ETo) می‌باشد. در مطالعه حاضر، مقدار پیش فرض غلظت دی اکسید کربن استفاده شد. پارامترهای گیاهی شامل تراکم کشت، تاریخ کشت، بهره‌وری آب نرمال‌سازی شده برای تبخیر و تعرق مرجع و غلظت دی‌اکسیدکربن جو (WP*) می‌باشد. پارامترهای خاکی شامل بافت خاک، محتوای آب اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی و هدایت هیدرولیک اشباع می‌باشد. مدیریت مزرعه‌ای شامل روش آبیاری، ارتفاع کرت و زمان آبیاری می‌باشد.

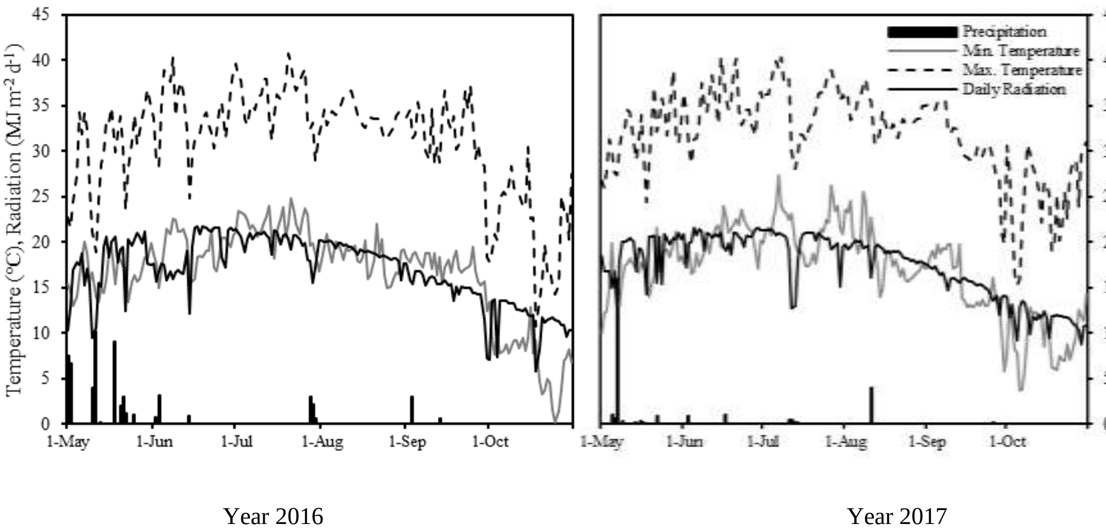
در این مطالعه از نسخه ۶/۱ آکوواکراپ (۶) برای شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی استفاده شد. مدل در حالت زمان حرارتی (درجه روز رشد) اجرا شد. دوره‌های شبیه‌سازی با چرخه رشد گیاه مرتبط بودند (روز اول پس از کاشت تا رسیدگی).

محل اجرای آزمایش

این پژوهش در دو سال متوالی (۹۶-۱۳۹۵) در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. بارندگی تجمعی در طول فصل رشد در سال اول آزمایش ۲۹/۹ و در سال دوم ۸/۳ میلی‌متر بود (شکل ۱). در طول فصل رشد، میانگین تشعشع خورشیدی ۱۸/۱۰ و ۱۸/۴۸ مگاژول بر متر مربع بر روز به‌ترتیب در سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ بود. میانگین حداقل و حداکثر دما در طول فصل رشد در سال ۹۵، ۱۸/۵ و ۳۳/۱ درجه سانتی‌گراد و در سال ۹۶، ۱۸/۴ و ۳۳/۲ درجه سانتی‌گراد بود (شکل ۱). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است.

طرح آماری و شرایط انجام آزمایش

آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با اجرای رژیم‌های مختلف آبیاری در مرحله رویشی و زایشی به ترتیب به عنوان فاکتورهای کرت‌های اصلی و فرعی در سه تکرار اجرا شد. نشاءهای ۳۵ روزه گوجه‌فرنگی با اندازه‌های یکسان (۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر) در مرحله ۴ تا ۵ برگی در ۲۷ کرتِ ۴/۵ در ۳ متری (۱۳/۵ متر مربع) در تاریخ‌های ۱۳۹۵/۲/۱۵ و ۱۳۹۶/۲/۱۵ با تراکم ۲/۶ بوته در متر مربع کاشته شدند.



شکل ۱- داده‌های روزانه هواشناسی ثبت شده در طول فصل رشد در دو سال اجرای آزمایش (ایستگاه هواشناسی مشهد)

Figure 1- Daily meteorological data for Mashhad, Iran, during crop growing season in the two years of the experiment (2016 and 2017; Mashhad Weather Station)

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه محل آزمایش

Table 1- Physical and chemical characteristics of the soil

عمق (سانتی‌متر) Depth (cm)	بافت Texture	پتاسیم K (mg/kg)	فسفر P (mg/kg)	نیتروژن کل Total N (%)	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	کربن آلی OC (%)	ماده آلی OM(%)	اسیدیته pH
0-30	Silty clay loam	289	13.5	0.076	6.75	0.65	1.12	8.15

فاصله بین ردیف‌های کاشت ۱/۵ متر و فاصله بین نشاءها ۰/۲۵ متر در نظر گرفته شد. به منظور جلوگیری از نشت آب بین کرت‌های تیمارهای مختلف، فاصله بین کرت‌های اصلی ۳ متر، کرت‌های فرعی ۱/۵ متر و تکرارها ۲/۵ متر درنظر گرفته شد.

آزمایش به نحوی اجرا شد که اثر کم‌آبیاری و سطوح مختلف آن در هر دو مرحله رویشی و زایشی مورد بررسی قرار گیرد، به این منظور فاکتورهای اصلی این آزمایش شامل: ۱-آبیاری کامل به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رویشی (*100V*)، ۲- آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد رویشی (*75V*)، ۳- آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد رویشی (*50V*) و فاکتورهای فرعی این آزمایش شامل: ۱- آبیاری کامل به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله زایشی (*100R*)، ۲- آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد زایشی (*75R*)، ۳- آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد زایشی (*50R*) بود. بنابراین این طرح شامل ۹ ترکیب تیماری می‌باشد. تیمارهای آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. از کاشت تا تشکیل ۱۰ درصد گل‌ها در هر کرت به عنوان مرحله رویشی و از ۱۰ درصد گل‌دهی تا پایان دوره رشد به عنوان مرحله زایشی در نظر گرفته شد.

محاسبه آب آبیاری

قبل از اجرای آزمایش، نیاز آبی گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از نرم‌افزار کراپ‌وات ۰/۸ محاسبه شد. اطلاعات مورد نیاز مدل کراپ‌وات شامل داده‌های گیاهی، اقلیمی و خاک بود. داده‌های هواشناسی (میانگین دمای ماهانه، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، سرعت باد و بارش) که اصلی‌ترین داده‌های مورد نیاز تخمین آب مورد نیاز گیاه در مدل کراپ‌وات می‌باشد از ایستگاه هواشناسی مشهد بدست آمد.

براساس داده‌های ۳۰ ساله هواشناسی (۲۰۱۵-۱۹۸۶ میلادی)، مقدار خالص آب مورد نیاز گوجه‌فرنگی در شرایط آب و هوایی مشهد و مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد، ۸۲۴/۵ میلی‌متر و کل آبیاری ناخالص، ۱۲۰۴/۵ میلی‌متر محاسبه شد. به منظور آبیاری گیاهان از روش آبیاری قطره‌ای استفاده شد. نوار تیپ‌های ۲۵ سانتی‌متری در مرکز هر ردیف دوتایی قرار داده شد.

جدول ۲- توصیف تیمارهای آزمایش

Table 2- Description of experimental treatments

تیمار (رژیم‌های آبیاری) Treatment (irrigation regimes)	توصیف تیمار Description
100V-100R	اعمال آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در تمامی مراحل رشد (آبیاری کامل) Irrigation applied 100% water requirement at the all growth stages (full irrigation)
100V-75R	اعمال آبیاری ۱۰۰ نیاز آبی در مرحله رویشی و ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 100% water requirement at the vegetative stage and 75% water requirement at the reproductive stage
100V-50R	اعمال آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 100% water requirement at the vegetative stage and 50% water requirement at the reproductive stage
75V-100R	اعمال آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۱۰۰ نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 75% water requirement at the vegetative stage and 100% water requirement at the reproductive stage
75V-75R	اعمال آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 75% water requirement at the vegetative stage and 75% water requirement at the reproductive stage
75V-50R	اعمال آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 75% water requirement at the vegetative stage and 50% water requirement at the reproductive stage
50V-100R	اعمال آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 50% water requirement at the vegetative stage and 100% water requirement at the reproductive stage
50V-75R	اعمال آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 50% water requirement at the vegetative stage and 75% water requirement at the reproductive stage
50V-50R	اعمال آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 50% water requirement at the vegetative stage and 50% water requirement at the reproductive stage

جدول ۳- مقادیر آب اعمال شده در رژیم‌های مختلف آبیاری
Table 3- Amount of water applied in different irrigation regimes

تیمار (رژیم‌های آبیاری) Treatment (irrigation regimes)	مرحله رویشی Vegetative stage (mm)	مرحله زایشی Reproductive stage (mm)	کل فصل رشد Total growing season (mm)
100V-100R	253.4	951.1	1204.5
100V-75R	253.4	713.3	966.7
100V-50R	253.4	475.6	729.0
75V-100R	190.1	951.1	1141.2
75V-75R	190.1	713.3	903.4
75V-50R	190.1	475.6	665.6
50V-100R	126.7	951.1	1077.8
50V-75R	126.7	713.3	840.0
50V-50R	126.7	475.6	602.3

تقریباً یک هفته بعد از انتقال هنگامی که بوته‌های گوجه‌فرنگی به خوبی مستقر شده بودند، تیمارهای آبیاری اجرا شد. آبیاری سه بار در هفته در زمان یکسان برای همه تیمارها بر اساس کل آبیاری ناخالص و برنامه آبیاری بدست آمده از کراپ‌وات اجرا شد. عمق آب مصرف‌شده در رژیم‌های مختلف آبیاری و در مراحل مختلف رشدی در جدول ۳ نشان داده شده است. برای تنظیم حجم مذکور در هر نوبت آبیاری از کنتور حجمی استفاده شد. به منظور جلوگیری از اختلاط حجم تیمارهای آبی برای آب ورودی تمام کرت‌ها شیر آب در نظر گرفته شد و در زمان آبیاری هر کرت شیرهای آب سایر کرت‌ها بسته بود.

جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های گیاهی

در هر دو فصل رشد، پارامترهای رشدی و فیزیولوژیکی گیاه با اندازه‌گیری دو بوته در هر کرت با فاصله دو هفته‌ای انجام شد. نمونه‌برداری از ۴۵ روز بعد از انتقال[1] نشاء (DAT) تا ۱۴۵ روز بعد از انتقال نشاء ادامه یافت. پس از نمونه‌برداری تخریبی و جدا کردن کامل بوته از سطح خاک، برگ، ساقه و میوه از یکدیگر جدا شدند. به منظور حذف اثر حاشیه، نمونه‌برداری‌ها از دو ردیف میانی در هر کرت انجام گرفت. بلافاصله بعد از جداسازی، سطح برگ با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (DeltaT Ltd., UK) اندازه‌گیری شد. همزمان با این اندازه‌گیری‌ها، میزان تشعشع رسیده به بالای کانوپی و تشعشع عبور کرده از کانوپی و رسیده به سطح زمین در پایین کانوپی از طریق قرار دادن حسگر دستگاه سپتومتر خطی (AccuPAR-LP80, Decagon Devices, USA) روی سطح زمین در دو طرف ردیف‌ها و در چهار جهت مختلف در فاصله ساعات ۱۲ تا ۱۴ برای تمام کرت‌های آزمایشی اندازه‌گیری و ثبت شد. برگ‌ها و سایر اندام‌های هوایی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت درون آون قرار گرفتند و سپس وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد. میوه‌های گوجه‌فرنگی به صورت دستی و هنگامی که به طور کامل رسیدند برداشت شدند. برداشت در هر دو فصل رشد در ۵ نوبت در تاریخ‌های یکم، چهاردهم، بیست و یکم، بیست و نهم مرداد ماه، دوازدهم شهریور ماه و دوم مهرماه انجام گرفت. هر کرت به دو بخش مساوی تقسیم شده بودند، یک بخش برای نمونه‌برداری‌های تخریبی در طول فصل رشد و بخش دیگر برای اندازه‌گیری عملکرد.

1- Day After Transplanting (DAT)

داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی شامل حداقل و حداکثر دمای روزانه، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، سرعت باد و بارندگی که اصلی‌ترین داده‌های مورد نیاز مدل آکوواکراپ می‌باشند در بازه سی‌ساله (از ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷ میلادی) از ایستگاه هواشناسی مشهد بدست آمد.

داده‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در مدل آکوواکراپ به داده‌های خاک شامل میزان آب در خاک در حالت اشباع (θsat)، ظرفیت زراعی (θFC)، نقطه پژمردگی دائم (θPWP) و هدایت هیدرولیک خاک اشباع (Ksat) نیاز می‌باشد. با توجه به اطلاعات به دست آمده از آزمایش خاک مزرعه (جدول ۱) و با استفاده از برنامه Soil Water Charactrristics (version 6.02.74) که توسط سازمان خدمات تحقیقات ایالات‌متحده آمریکا توسعه داده شده است، خصوصیات خاک ذکر شده در بالا به منظور استفاده در مدل آکوواکراپ برآورد شدند.

داده‌های رطوبت خاک

دور آبیاری براساس برنامه آبیاری حاصل از برآورد مدل کراپ‌وات تنظیم شد. دور آبیاری در طول فصل رشد ثابت نبود و بسته به مرحله رشد و نیاز آن مرحله به آب تغییر می‌کرد. اما به طور کلی و در اکثر مراحل، آبیاری هر دو روز یکبار انجام شد. همه آبیاری‌ها در محدوده زمانی ساعت ۸ تا ۱۰ صبح انجام شدند. اندازه‌گیری رطوبت در

محدوده توسعه ریشه با استفاده از دستگاه انعکاس سنجی زمانی (TDR) در همه تیمارها صورت گرفت. اندازه‌گیری‌ها در سه نوبت شامل قبل از آبیاری، ۵ ساعت بعد از آبیاری و یک روز بعد از آبیاری انجام شد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

واسنجی عبارت است از تخمین پارامترهای مدل به نحوی که اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده (متغیرهایی شامل تولید زیست‌توده و عملکرد) و مقادیر محاسباتی آن که توسط مدل برآورد شده است به حداقل برسد. تمامی داده‌های ورودی مورد نیاز بر اساس داده‌های به دست آمده از فصل کشت اول (۱۳۹۵) وارد مدل شد. مرحله واسنجی با استفاده از روش سعی و خطا تا رسیدن به بهترین توافق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به طور دقیق انجام شد و مقادیر پارامترهای گیاهی نهایی برآورد شد (۷).

صحت‌سنجی یکی از مهم‌ترین مراحل تأیید مدل‌های شبیه‌سازی می‌باشد. صحت‌سنجی مدل آکوواکراپ برای گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای بدست آمده از فصل زراعی دوم (۱۳۹۶) و بدون تغییر در پارامترهایی نهایی شده در مرحله واسنجی برای تمامی تیمارهای مورد بررسی انجام شد. خروجی‌های بدست آمده از این مرحله نیز با مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر در آزمایش مزرعه‌ای مقایسه شد.

ارزیابی مدل

ارزیابی مدل، اثبات کارایی مدل به منظور استفاده آتی می‌باشد. به منظور ارزیابی دقت مدل آکوواکراپ در پیش‌بینی پوشش کانوپی، تولید زیست‌توده و عملکرد میوه گوجه‌فرنگی از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (ME)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط ۴ تا ۹ نشان داده شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}}$$ رابطه (۴)

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}}}{\bar{O_i}}$$ رابطه (۵)

$$ME = \frac{\sum_{i}^{n}(P_i-O_i)}{n}$$ رابطه (۶)

$$EF = 1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2}$$ رابطه (۷)

$$d = 1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i|-|O_i|)^2}$$ رابطه (۸)

$$R^2 = \frac{(\sum(P_i-\bar{P})(O_i-\bar{O})^2)}{\sum(P_i-\bar{P})^2\sum(O_i-\bar{O})^2}$$ رابطه (۹)

در روابط فوق P_i مقدار شبیه‌سازی‌شده، O_i مقدار اندازه‌گیری‌شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقدار مثبت آماره ME نشان‌دهنده این است که مدل آکووکراپ مقدار پارامتر موردنظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل مقدار پارامتر موردنظر را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است.

مقدار EF نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد.

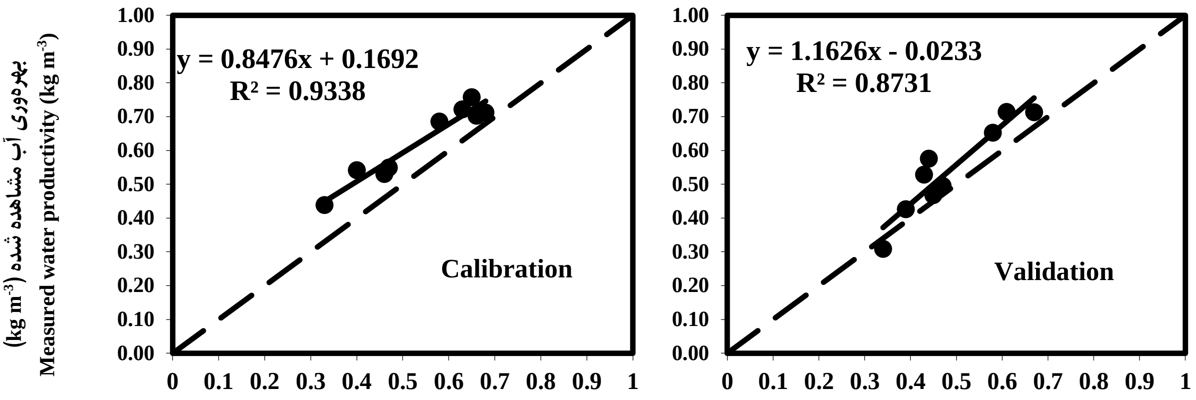
نتایج و بحث

شبیه‌سازی بهره‌وری آب

بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده در مزرعه با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل مقایسه شد و نتایج آن در جدول ۵ و شکل ۲ ارائه شده است. علاوه براین نتایج بدست آمده از محاسبه شاخص‌های آماری به منظور ارزیابی کارایی مدل در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده همبستگی بسیار خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده در هر دو مرحله واسنجی (R^2 = ۰/۹۳) و صحت‌سنجی (R^2 = ۰/۸۷) داشت. بررسی مقادیر شاخص میانگین مربعات خطای نرمال شده در مرحله واسنجی (NRMSE = ٪۱۴/۸۱) و صحت‌سنجی (NRMSE = ٪۱۳/۶۴) (جدول ۴) نشان داد که مدل آکوواکراپ قادر به شبیه‌سازی میزان بهره‌وری آب گوجه‌فرنگی در سطح قابل قبولی بود.

بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده در مزرعه دامنه‌ای از ۰/۴۴ تا ۰/۷۶ کیلوگرم در مترمکعب در سال ۱۳۹۵ و از ۰/۳۱ تا ۰/۷۱ کیلوگرم در متر مکعب در سال ۱۳۹۶را به خود اختصاص داد. نتایج شبیه‌سازی در مطالعه حاضر نشان داد که بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده با مدل آکوواکراپ در سال ۱۳۹۵ در محدوده‌ای از ۰/۳۳ تا ۰/۶۸ کیلوگرم در متر مکعب و از ۰/۳۴ تا ۰/۶۷ کیلوگرم در متر مکعب در سال ۱۳۹۶ قرار داشت.

اختلاف تقریباً بالایی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در مرحله واسنجی (۶ تا ۲۶ درصد) و صحت سنجی (۶ تا ۲۳ درصد) مشاهده شد. این اختلافات در واقع بیانگر این است که آکوواکراپ مقادیر بهره‌وری آب را در سطح خوبی شبیه‌سازی نکرده است و در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی تمایل مدل به کم‌برآورد مقادیر بهره‌وری آب مشهود بود. بالاترین مقادیر خطا در مرحله واسنجی مربوط به تیمارهایی است که در هر دو مرحله رویشی و زایشی بیشتر تحت تنش آب قرار گرفته بودند.



شکل ۲- مقایسه بهره‌وری آب (کیلوگرم عملکرد خشک میوه در هکتار بر متر مکعب آب تبخیر و تعرق یافته) مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده همه تیمارها در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 2- Comparison between measured and simulated values of water productivity (kg m^{-3}) from all water treatments for calibration and validation

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی بهره‌وری آب (کیلوگرم عملکرد خشک میوه در هکتار بر مترمکعب آب تبخیر و تعرق یافته) در مراحل واسنجی و صحت سنجی

Table 4- Statistical indices derived for evaluating the performance of AquaCrop model in predicting water productivity (kg m^{-3}) for calibration and validation

مرحله شبیه‌سازی Simulation	شاخص‌های ارزیابی مدل Model evaluation indices					
	RMSE	NRMSE(%)	d	R^2	RE	ME
واسنجی Calibration	0.09	14.81	0.85	0.93	-13.86	0.23
صحت‌سنجی Validation	0.07	13.64	0.90	0.87	-10.29	0.66

جدول ۵- مقایسه مقادیر بهره‌وری آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده (کیلوگرم عملکرد خشک میوه در هکتار بر متر مکعب آب تبخیر و تعرق یافته) در مراحل واسنجی و صحت سنجی در تیمارهای مختلف آبیاری

Table 5- Comparison between measured and simulated values of water productivity (kg m^{-3}) from all water treatments for calibration and validation

رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	واسنجی Calibration			صحت سنجی Validation		
	مشاهده‌شده Measured	شبیه‌سازی‌شده Simulated	RE (%)	مشاهده‌شده Measured	شبیه‌سازی‌شده Simulated	RE (%)
100V-100R	0.70	0.66	-6.0	0.71	0.67	-5.6
100V-75R	0.72	0.63	-12.7	0.71	0.67	-6.0
100V-50R	0.71	0.68	-4.5	0.53	0.43	-18.6
75V-100R	0.53	0.46	-13.3	0.58	0.44	-23.6
75V-75R	0.69	0.58	-15.5	0.65	0.58	-11.1
75V-50R	0.76	0.65	-14.3	0.47	0.45	-3.9
50V-100R	0.55	0.47	-14.5	0.50	0.47	-5.1
50V-75R	0.54	0.40	-26.2	0.43	0.39	-8.5
50V-50R	0.44	0.33	-24.8	0.31	0.34	-10.0

بهبود بهره‌وری آب گیاه (کارایی مصرف آب گیاه) عاملی بسیار مهم در بهبود تولیدات کشاورزی تحت سناریوهای منابع آب محدود، افزایش تقاضای مواد غذایی و تغییر اقلیم به شمار می‌رود. تخمین کارایی مصرف آب از طریق آزمایش‌های میدانی همیشه امکان‌پذیر نیست چون که محاسبه دقیق آن مستلزم ارزیابی طیف گسترده‌ای از تلفیق مدیریت‌های مختلف مزرعه‌ای از جمله تاریخ و تراکم کاشت، مقدار و زمان اجرای آبیاری، کاربرد کود و سایر موارد متنوع دیگر می‌باشد. این در حالی است که به منظور پر کردن خلأ موجود، مدل‌های شبیه‌سازی دقیق می‌توانند سودمند باشند (۲۱). در اکثر مطالعات انجام شده با استفاده از مدل آکوواکراپ برای گوجه‌فرنگی (۳، ۴ و ۱۵) کارایی مدل برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

احمدی و همکاران (۱) گزارش کردند که خطای پیش‌بینی مدل در شبیه‌سازی بهره‌وری آب ذرت از ۲/۳۵ تا ۲۷/۵ درصد برای سطوح مختلف آبی و کودی متغیر بود. با این حال، آنها مقدار میانگین مربعات خطا را ۰/۱۲ کیلوگرم در مترمکعب و شاخص EF را در محدوده ۰/۶۶ تا ۰/۷۴ بدست آوردند که نشان‌دهنده کارکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی بهره‌وری آب بود. کاترجی و همکاران (۱۴) گزارش کردند که کارایی مدل در شبیه‌سازی بهره‌وری آب گوجه‌فرنگی مطلوب نبود و مدل تمایل به بیش‌برآورد مقادیر بهره‌وری آب در اکثر تیمارها داشت. آنها علت را خطا در شبیه‌سازی دقیق پوشش کانوپی و ضریب تعرق گیاهی و در نهایت تأثیر آن بر عملکرد گیاه بیان کردند. ایوت و تولک (۵) در تلاش برای کشف چگونگی کارکرد مدل‌های مختلف در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب چندین محصول زراعی شامل پنبه، ذرت، کینوآ (*Chenopodium quinoa*) و آفتابگردان نتیجه گرفتند که مدل‌های شبیه‌سازی قادر به تخمین مطلوب کارایی مصرف آب تحت شرایط بدون تنش آب بودند اما در شرایط تنش آب کارکرد آن‌ها کاهش یافت. این تمایل مدل، قابلیت اجرای آن برای شناسایی سناریوهای کم آبیاری یا دیم را محدود می‌کند.

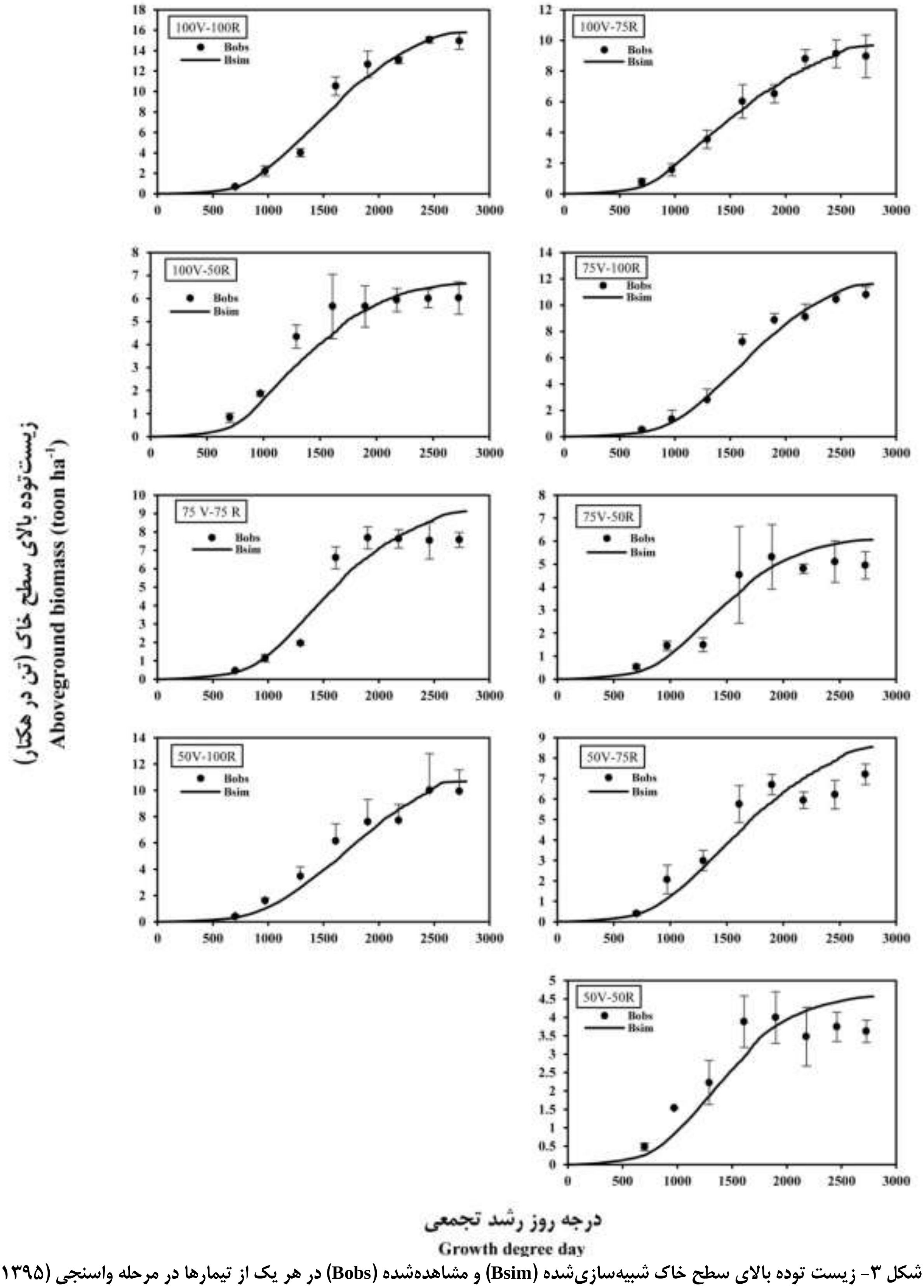
شبیه‌سازی زیست‌توده بالای سطح خاک

شکل‌های ۳ و ۴ مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده به ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی را برای ۹ تیمار مختلف آبیاری نشان می‌دهد. شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در پیش‌بینی زیست‌توده بالای سطح خاک در جدول ۶ آورده شده است. NRMSE پایین و R^2 بالا نشان‌دهنده شبیه‌سازی رضایت‌بخش توسعه زیست‌توده در مرحله واسنجی (RMSE = ۰/۷۹ ton/ha) و صحت‌سنجی (RMSE = ۰/۷۶ ton/ha) می‌باشد. مقادیر RMSE در مرحله واسنجی بین ۰/۴۲ تا ۱/۰۷ تن در هکتار متغیر بود، در حالی که این مقادیر در مرحله صحت‌سنجی دامنه‌ای از ۰/۳۷ تا ۱/۰۷ تن در هکتار را شامل شد (جدول ۶). با توجه به نتایج بدست آمده در مرحله واسنجی، حداکثر NRMSE در تیمار *50V-50R* با ۲۳ درصد و حداقل NRMSE در تیمار *100V-75R* معادل ۷/۴ درصد بدست آمد. این در حالی است که در مرحله صحت‌سنجی حداکثر NRMSE در تیمار *75V-75R* به میزان ۲۱/۳ درصد و حداقل NRMSE در تیمار *75V-100R* معادل ۱۰/۶ درصد بدست آمد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که اغلب عدم تطابق خوب بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در اواخر دوره رشد بود، بعلاوه تیمارهایی که با تنش آب مواجه هستند باعث افزایش خطا در شبیه‌سازی شده‌اند.

ساکماکیس و همکاران (۲۴) با اجرای مدل آکوواکراپ برای گوجه‌فرنگی گزارش کردند که شبیه‌سازی زیست‌توده تا قبل از ۱۴۰ روز بعد از کاشت به خوبی انجام شد اما پس از آن و در مرحله نهایی رشد گیاه مقادیر زیست‌توده اندازه‌گیری شده نسبت به شبیه‌سازی شده در هر دو سال آزمایش پایین‌تر بود. با توجه به مقادیر به دست آمده از محاسبه شاخص خطای نسبی (RE) (جدول ۶)، در مرحله واسنجی، مدل در بیشتر تیمارها تمایل به کم‌برآوردی ماده خشک دارد این در حالی است که در مرحله صحت‌سنجی، مدل همه مقادیر شبیه‌سازی شده ماده خشک در همه تیمارها را نسبت به مقادیر مشاهده شده بیشتر برآورد کرده است. RE در مرحله واسنجی محدوده‌ای بین ۵/۳۰ تا ۵/۳۰- و در مرحله صحت‌سنجی محدوده‌ای بین ۱/۳۵ تا ۱۱/۰۲ درصد را شامل می‌شود. کاترجی و همکاران (۱۴) گزارش کردند که آکوواکراپ تمایل به بیش‌برآورد زیست‌توده گوجه‌فرنگی در تیمارهای تنش آبی داشت. آنها همچنین بیان کردند که آکوواکراپ قادر به پیش‌بینی زیست‌توده گوجه‌فرنگی در شرایط تنش آبی با دقت قابل قبولی می‌باشد.

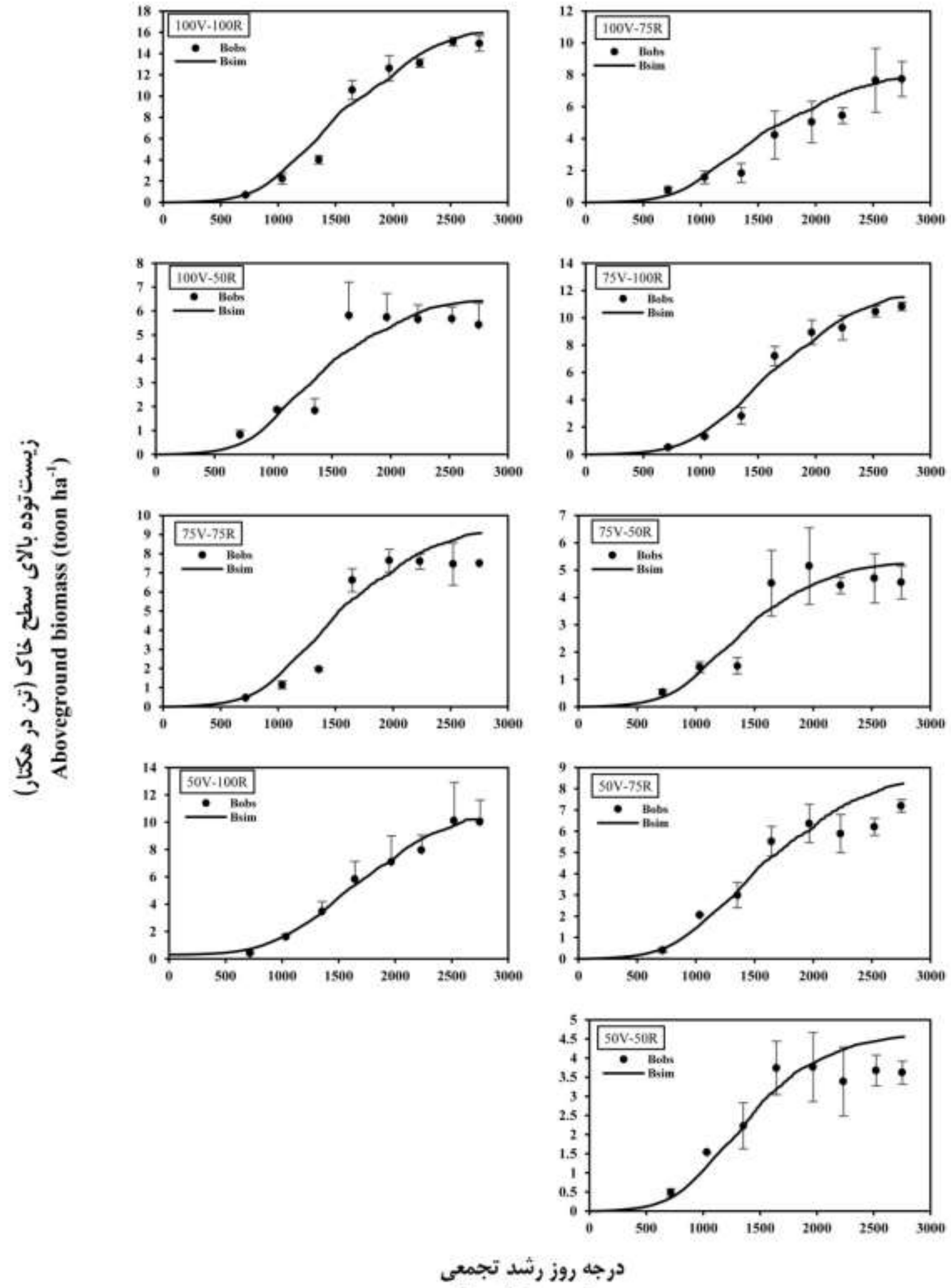
شبیه‌سازی عملکرد گوجه‌فرنگی

در شکل ۵ و ۶ به ترتیب، مقایسه مقادیر عملکرد خشک و تر مشاهده شده و پیش‌بینی شده گوجه‌فرنگی توسط مدل آکوواکراپ تحت رژیم‌های مختلف آبیاری طی مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل ارائه شده است. همچنین مقادیر عددی شاخص‌های آماری مربوط به ارزیابی مدل در پیش‌بینی عملکرد خشک و تر میوه در جدول ۷ آورده شده است.



شکل ۳- زیست توده بالای سطح خاک شبیه‌سازی‌شده (Bsim) و مشاهده‌شده (Bobs) در هر یک از تیمارها در مرحله واسنجی (۱۳۹۵)

Figure 3- Observed (Bobs) and simulated (Bsim) values of aboveground biomass under different irrigation regimes during growing season for calibration (2016 year)



شکل ۴- زیست توده بالای سطح خاک شبیه‌سازی‌شده (Bsim) و مشاهده‌شده (Bobs) در هر یک از تیمارها در مرحله صحت‌سنجی (۱۳۹۶)

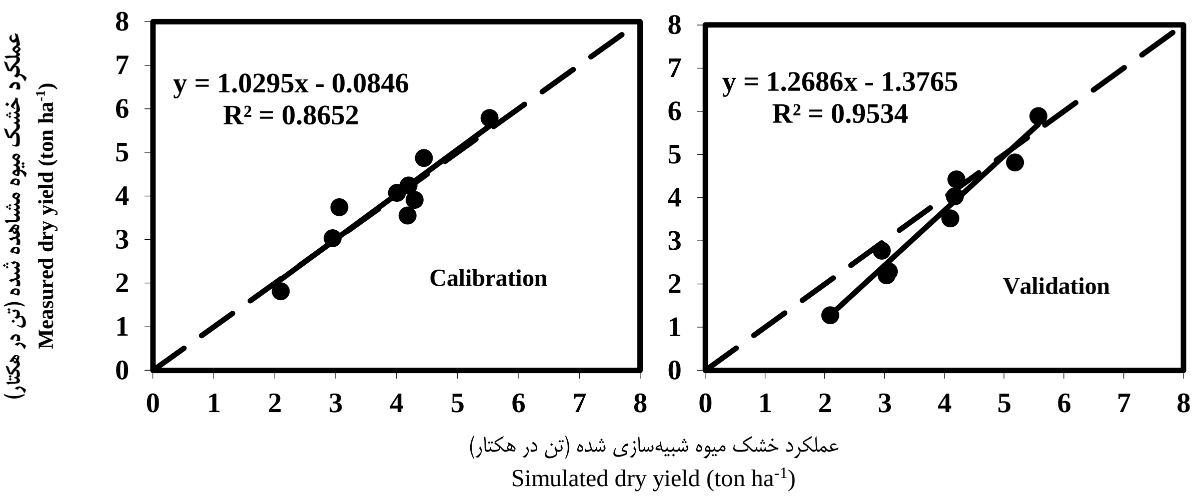
Figure 4- Observed (Bobs) and simulated (Bsim) values of aboveground biomass under different irrigation regimes during growing season for validation (2017 year)

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده بالای سطح خاک گوجه‌فرنگی (تن در هکتار) در تیمارهای مختلف آبیاری

Table 6- Statistical indices derived for evaluating the performance of AquaCrop model in predicting above-ground biomass in different irrigation treatments

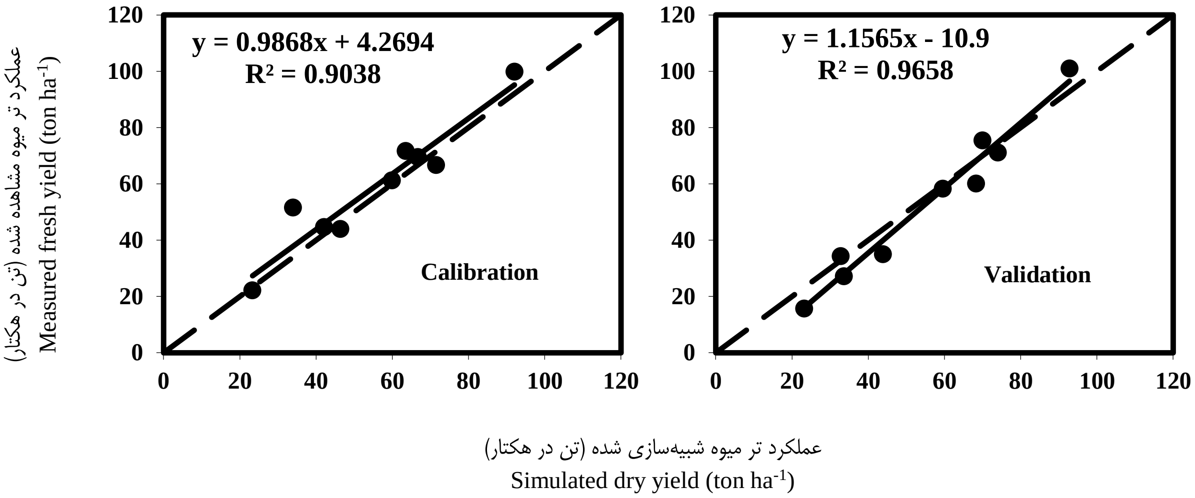
مرحله شبیه‌سازی Simulation	رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	شاخص‌های ارزیابی مدل Model evaluation indices						
		RMSE	NRMSE(%)	EF	d	R^2	RE	ME
واسنجی Calibration	**100V-100R**	0.98	10.8	0.97	0.99	0.98	-0.66	0.97
	100V-75R	0.42	7.4	0.98	1	0.99	-.54	0.98
	100V-50R	0.70	15.5	0.87	0.97	0.96	-6.01	0.87
	75V-100R	0.81	12.7	0.96	0.99	0.98	-2.14	0.96
	75V-75R	1.00	19.7	0.89	0.97	0.95	2.44	0.89
	75V-50R	0.71	20.3	0.85	0.97	0.95	5.30	0.85
	50V-100R	0.83	14.1	0.94	0.99	0.98	-5.30	0.94
	50V-75R	1.07	22.9	0.79	0.96	0.94	1.09	0.80
	50V-50R	0.66	23	0.71	0.94	0.92	-0.78	0.71
میانگین Average		**0.79**	**16.26**	**0.88**	**0.97**	**0.96**	**-0.73**	**0.88**
صحت‌سنجی Validation	**100V-100R**	1.07	11.7	0.96	0.99	0.98	3.54	0.96
	100V-75R	0.78	18.6	0.90	0.98	0.97	11.02	0.90
	1007-50R	0.83	20.3	0.83	0.96	0.92	1.86	0.83
	75V-100R	0.68	10.6	0.97	0.99	0.99	2.75	0.97
	75V-75R	1.07	21.3	0.87	0.97	0.95	9.94	0.87
	75V-50R	0.64	19.2	0.86	0.96	0.93	1.98	0.86
	50V-100R	0.37	6.5	0.99	1	0.99	1.35	0.99
	50V-75R	0.87	19	0.85	0.97	0.96	7.01	0.85
	50V-50R	0.57	20.5	0.76	0.95	0.95	7.00	0.76
میانگین Average		**0.76**	**16.41**	**0.89**	**0.97**	**0.96**	**5.16**	**0.89**

براساس نتایج جدول ۷ مدل آکوواکراپ، عمکرد خشک میوه را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کرد. مقدار NRMSE برای مرحله واسنجی کمتر از ۱۰ درصد بدست آمد که براساس این آماره، مدل‌سازی عملکرد، ایده‌آل است. مقادیر این آماره به ترتیب برای عملکرد خشک واسنجی و صحت‌سنجی شده به ترتیب ۹/۹۷ و ۱۵/۶۴ درصد بدست آمد. شکل ۵ رگرسیون خطی بین مقادیر نهایی عملکرد خشک شبیه‌سازی شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده در مزرعه را نشان می‌دهد.



شکل ۵- مقایسه عملکرد خشک میوه مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده همه تیمارها در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 5- Comparison between measured and simulated values of dry yield from all water treatments for calibration and validation



شکل ۶- مقایسه عملکرد تر میوه مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده همه تیمارها در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 6- Comparison between measured and simulated values of fresh yield from all water treatments for calibration and validation

مقدار R^2 برای مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب معادل ۰/۸۶ و ۰/۹۵، نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد خشک محصول، توافق و همبستگی خوبی با مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) دارد. بعلاوه شیب و عرض از مبداء خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی تفاوت معنی‌داری با خط ۱:۱ نداشت (شکل ۵). مقادیر ME نزدیک به یک، نشان از کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد خشک در همه تیمارها دارد. شاخص توافق ویلموت (d) نیز نزدیک به یک است که نشان‌دهنده انطباق روند کاهش عملکرد خشک با مقدار آب آبیاری در مدل، با عملکرد خشک واقعی است و بیانگر توافق بهتر بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده است.

جدول ۷- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد خشک و تر میوه گوجه‌فرنگی (تن در هکتار) در مراحل واسنجی و صحت سنجی

Table 7- Statistical indices derived for evaluating the performance of AquaCrop model in predicting fresh and dry yield (ton per ha) for calibration and validation

مرحله شبیه‌سازی Simulation	عملکرد میوه Fruit yield	شاخص‌های ارزیابی مدل Model evaluation indices					
		RMSE	NRMSE(%)	d	R^2	RE	ME
واسنجی Calibration	عملکرد خشک Dry yield	0.39	9.97	0.96	0.86	0.75	0.86
	عملکرد تر Fresh yield	7.32	12.40	0.97	0.90	-5.99	0.87
صحت‌سنجی Validation	عملکرد خشک Dry yield	0.54	15.64	0.95	0.95	10.13	0.85
	عملکرد تر Fresh yield	6.27	11.80	0.98	0.96	4.2	0.94

مقادیر شاخص خطای نسبی (RE %) به تفکیک برای هر تیمار در جداول ۸ و ۹ به ترتیب برای عملکرد خشک و تر میوه گوجه‌فرنگی آمده است. براساس جدول ۸ مقادیر RE_{max} و RE_{min}، در مرحله واسنجی عملکرد خشک میوه به ترتیب مربوط به تیمارهای آبیاری *75V-50R* و *100V-50R* معادل ۱۷/۷ و ۱۸/۲- درصد بود. همچنین در مرحله صحت‌سنجی عملکرد خشک میوه مقادیر RE_{max} و RE_{min} به ترتیب مربوط به تیمارهای آبیاری *50V-50R* و *100V-100R* بود که مقادیر خطا به‌ترتیب ۶۴/۶ و ۵/۴- درصد بدست آمد. RE مثبت

نشان می‌دهد که مدل عملکرد را بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده، و مقادیر منفی RE نشان می‌دهد که مدل عملکرد را نسبت به مقادیر مشاهده‌شده کمتر برآورد کرده است.

به منظور تخمین عملکرد تر میوه از عملکرد خشک میوه شبیه‌سازی شده، از نتایج بدست آمده از میزان رطوبت میوه گوجه‌فرنگی در این مطالعه استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده، میزان رطوبت میوه تیمارهایی که ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی را در مرحله زایشی دریافت کرده بودند به ترتیب تقریباً برابر با ۹۴، ۹۳ و ۹۱ درصد بود. براساس نتایج شکل ۶، همبستگی بسیار خوبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد تر میوه در هر دو مرحله واسنجی (R^2 = ۰/۹۰) و صحت سنجی (R^2 = ۰/۹۶) مشاهده شد. بنابراین مدل آکوواکراپ موفق به شبیه‌سازی عملکرد تر میوه در هر دو مرحله واسنجی (NRMSE = ٪۱۲/۴۰) و صحت‌سنجی (NRMSE = ٪۱۱/۸۰) (جدول ۷) در سطح قابل اطمینانی شد. مقایسه مقادیر عملکرد تر مشاهده شده با شبیه‌سازی شده (جدول ۹) نشان داد که مدل در مرحله واسنجی برای اغلب تیمارها تمایل به بیش‌برآورد کردن و در مرحله صحت‌سنجی تمایل به کم‌برآورد کردن عملکرد تر میوه داشت.

جدول ۸- مقایسه مقادیر عملکرد خشک میوه گوجه‌فرنگی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده (تن در هکتار) در مراحل واسنجی و صحت سنجی در تیمارهای مختلف آبیاری

Table 8. Comparison between measured and simulated values of dry yield (ton ha^{-1}) from all water treatments for calibration and validation

رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	واسنجی Calibration			صحت سنجی Validation		
	مشاهده‌شده Measured	شبیه‌سازی‌شده simulated	RE (%)	مشاهده‌شده measured	شبیه‌سازی‌شده Simulated	RE (%)
100V-100R	5.79	5.52	-4.6	5.89	5.57	-5.4
100V-75R	4.87	4.45	-8.7	4.81	5.18	7.7
100V-50R	3.74	3.06	-18.2	2.77	2.95	6.5
75V-100R	4.07	4.00	-1.6	4.42	4.20	-5.0
75V-75R	4.24	4.19	-1.1	4.03	4.17	3.5
75V-50R	3.55	4.18	17.7	2.20	3.03	37.7
50V-100R	3.91	4.29	9.8	3.52	4.10	16.5
50V-75R	3.03	2.95	-2.7	2.29	3.07	34.1
50V-50R	1.81	2.10	16.0	1.27	2.09	64.6

عدم دقت در شبیه‌سازی عملکرد میوه توسط مدل آکوواکراپ تحت شرایط تنش شدید آبی به گونه‌ای است که به نظر می‌رسد الگوریتم یا طرز عمل مدل برای شبیه‌سازی همزمان شدت، زمان و مدت تنش آبی بویژه در طول مرحله پیری دقت کافی را نداشته باشد (۱۰). علاوه بر این عدم دقت در شبیه‌سازی کل محتوای آب خاک و تخصیص دقیق آب به تبخیر و تعرق گیاه ممکن است وجود اریبی در شبیه‌سازی عملکرد را توضیح دهد (۲۱). با این حال کاترجی و همکاران (۱۴) پیش‌بینی ضعیف مدل در شبیه‌سازی عملکرد گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش آبی را به شبیه‌سازی نامناسب پوشش کانوپی (CC) نسبت دادند، و پیشنهاد کردند که ضرایب مربوط به رشد پوشش کانوپی به کار رفته در واسنجی مدل دوباره ارزیابی شوند. آن‌ها همچنین بیان داشتند که حتی اگر پارامترهای رشد گیاه براساس داده‌های مشاهده‌شده مزرعه‌ای تنظیم شده باشند، اختلاف بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای محتوای آب خاک و همچنین تبخیر و تعرق گیاه ممکن است بر تخمین عملکرد تحت شرایط تنش آب تأثیرگذار باشد.

باتیلانی و همکاران (۳) با هدف تجزیه و تحلیل قابلیت آکوواکراپ تحت رویکردهای مختلف آبیاری در طول دوره رشد به بررسی پیش‌بینی این مدل برای گوجه‌فرنگی با استفاده از مجموعه داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های آبیاری طی دوره‌ای ۹ ساله در ایتالیا پرداختند. این محققین دقت مطلوب مدل در شبیه‌سازی عملکرد میوه گوجه‌فرنگی را گزارش کردند به گونه‌ای که با مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد میوه در مرحله واسنجی، RMSE=۰/۷۰۵ ، d =۰/۹۸۳ و RE_{max} =–۱۶/۷۳ بدست آمد، در حالی که در مرحله صحت‌سنجی مقادیر d ،RMSE و RE_{max} به‌ترتیب ۱/۰۵۱۶، ۰/۹۲۸۹ و ۳۰/۶۱ بدست آمد. بنابراین آنها نتیجه‌گیری کردند که مدل در مرحله واسنجی تمایل به کم برآورد و در مرحله صحت سنجی تمایل به بیش برآورد داده‌های شبیه‌سازی شده نسبت به داده‌های مشاهده‌ای دارد. به طور کلی با توجه به نتایج بدست آمده، مدل آکوواکراپ قادر به پیش‌بینی مطلوب عملکرد میوه خشک و تر گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بود.

جدول ۹- مقایسه مقادیر عملکرد تر میوه گوجه‌فرنگی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده (تن در هکتار) در مراحل واسنجی و صحت سنجی در تیمارهای مختلف آبیاری

Table 9- Comparison between measured and simulated values of fresh yield (ton ha^{-1}) from all water treatments for calibration and validation

رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	واسنجی Calibration			صحت سنجی Validation		
	مشاهده‌شده Measured	شبیه‌سازی‌شده Simulated	RE (%)	مشاهده‌شده Measured	شبیه‌سازی‌شده Simulated	RE (%)
100V-100R	99.81	92.05	-7.8	101.01	92.83	-8.1
100V-75R	71.69	63.53	-11.4	71.13	74.00	4.0
100V-50R	51.58	33.99	-34.1	34.28	32.78	-4.4
75V-100R	9.49	66.73	-4.0	75.50	70.00	-7.3
75V-75R	61.24	59.91	-2.2	58.24	59.57	2.3
75V-50R	44.02	46.43	5.5	27.19	67.30	23.8
50V-100R	66.73	71.55	7.2	60.13	68.33	13.7
50V-75R	44.68	42.11	-5.7	35.03	43.86	25.2
50V-50R	22.22	23.32	5.0	15.66	23.22	48.3

نتیجه‌گیری

مدل آکوواکراپ (نسخه ۶/۱) به منظور شبیه‌سازی بهره‌وری آب، زیست توده بالای سطح خاک و عملکرد میوه خشک و تر گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد واسنجی و صحت‌سنجی شد. در مرحله واسنجی مقادیر پارامترهای گیاهی با دقت بالا استخراج شد. علی‌رغم عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی بهره‌وری آب در تیمارهای مختلف، نتایج نشان داد که آکوواکراپ مقادیر بهره‌وری آب را در سطح خوبی شبیه‌سازی نکرده است و در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی تمایل مدل به کم‌برآورد مقادیر بهره‌وری آب مشهود بود. بالاترین مقادیر خطا در مرحله واسنجی مربوط به تیمارهایی است که در هر دو مرحله رویشی و زایشی بیشتر تحت تنش آب قرار گرفته بودند. با این حال توافق خوبی بین مقادیر زیست‌توده بالای سطح خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود داشت. این درحالی بود که تیمارهایی که با تنش آب شدید مواجه بودند، باعث افزایش خطا در شبیه‌سازی شدند. به طور کلی نتایج صحت‌سنجی توافق خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای توسعه زیست‌توده بالای سطح خاک در همه تیمارها با مقادیر R^2 بالا (< ۰/۹۲)، EF قابل قبول (< ۰/۷۶)، خطای پایین (RMSE، دامنه‌ای بین ۰/۳۷ تا ۱/۰۷) و مقادیر d بالا (< ۰/۹۵) نشان داد. همچنین مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده در دامنه ۶/۵ تا ۲۱/۳ درصد برای پیش‌بینی زیست‌توده بالای سطح خاک در محدوده قابل قبول بود.

به طور کلی شاخص‌های آماری NRMSE، d، R^2، RE و ME برای عملکرد خشک میوه گوجه‌فرنگی ۹/۹۷، ۰/۹۶، ۰/۸۶، ۰/۷۵- و ۰/۸۶ درصد و ۱۵/۶۴، ۰/۹۵، ۰/۹۵، ۱۰/۱۳ و ۰/۸۵ درصد برای مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بدست آمد که دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی عملکرد خشک میوه را نشان می‌دهد.

بنابراین علی‌رغم کاهش کارایی مدل در شبیه‌سازی تیمارهای تحت شرایط تنش آبی شدید، نتایج این پژوهش نشان داد که مدل آکوواکراپ با سطح اطمینان قابل قبولی می‌تواند رشد و نمو گوجه‌فرنگی را در شرایط تنش آبی شبیه‌سازی کند. از اینرو از مدل آکوواکراپ به عنوان یک ابزار مدیریتی کارآمد می‌توان در انتخاب بهینه‌ترین سناریو آبیاری در کشت گوجه‌فرنگی استفاده کرد.

منابع

1- Ahmadi S. H., Mosallaeepour E., Kamgar-Haghighi A.A., and Sepaskhah A.R. 2015. Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. Water Resources Management 29: 2837-2853.

2- Araya A., Keesstra S.D., and Stroosnijder L. 2010b. Simulating yield response to water of Teff (*Eragrostis tef*) with FAO's AquaCrop model. Field Crops Research 116: 196-204.

3- Battilani A., Letterio T., and Chiari G. 2015. Aquacrop model calibration and validation for processing tomato crop in a sub-humid climate. pp. 167-174. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium.

4- Doorenbos J., and Kassam A. 1979. Yield response to water. Irrigation and drainage paper 33, 257.

5- Evett S.R., and Tolk J.A. 2009. Introduction: Can Water Use Efficiency Be Modeled Well Enough to Impact Crop Management? Agronomy Journal 101: 423-425.

6- FAO. 2019. Downloads for AquaCrop (Version 6.1) Standard Window Program and Plug-in Program. http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html.

7- Farrokhi E., Nassiri Mahallati M., Koocheki A., and Beheshti S.A. 2021. Simulation of growth and development of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Under drought stress: 1- simulation of soil water content, evapotranspiration and green canopy cover. Journal of Water and Soil 35(3): 299-318. (In Persian with English abstract)

8- Foster T., Brozović N., Butler A.P., Neale C.M.U., Raes D., Steduto P., Fereres E., and Hsiao T.C. 2017. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. Agricultural Water Management 181: 18-22.

9- Greaves E.G., and Wang Y.-M. 2016. Assessment of FAO AquaCrop Model for Simulating Maize Growth and Productivity under Deficit Irrigation in a Tropical Environment. Water 8.

10- Heng L.K., Hsiao T., Evett S., Howell T., and Steduto P. 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. Agronomy Journal 101: 488-498.

11- Heuvelink E. 2018. Tomatoes, 2nd edition. Boston, MA: CABI.

12- Hsiao T.C., Heng L., Steduto P., Rojas-Lara B., Raes D., and Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. Agronomy Journal 101: 448-459.

13- Ismail S., El-Abedin T.Z., El-Ansary D., and Abdel-Al A. 2015. Modification of FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water for Peach Trees. Misr Journal Agriculture Engineering 32: 145-172.

14- Katerji N., Campi P., and Mastrorilli M. 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. Agricultural Water Management 130: 14-26.

15- Linker R., Ioslovich I., Sylaios G., Plauborg F., and Battilani A. 2016. Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato. Agricultural Water Management 163: 236-243.

16- Ngouajio M., Wang G., and Goldy R. 2007. Withholding of drip irrigation between transplanting and flowering increases the yield of field-grown tomato under plastic mulch. Agricultural Water Management 87: 285-291.

17- Patanè C., and Cosentino S.L. 2010. Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. Agricultural Water Management 97: 131-138.

18- Patanè C., Tringali S., and Sortino O. 2011. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. Scientia Horticulturae 129: 590-596.

19- Pawar G.S., Kale M.U., and Lokhande J.N. 2017. Response of aquacrop model to different irrigation schedules for irrigated cabbage. Agricultural Research 6: 73-81.

20- Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., and Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. Agronomy Journal 101: 438-447.

21- Sandhu R., and Irmak S. 2019. Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. Agricultural Water Management 223: 105687.

22- Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., and Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. Agronomy Journal 101: 426-437.

23- Stricevic R., Cosic M., Djurovic N., Pejic B., and Maksimovic L. 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. Agricultural Water Management 98: 1615-1621.

24- Tsakmakis I.D., Kokkos N.P., Gikas G.D., Pisinaras V., Hatzigiannakis E., Arampatzis G., and Sylaios G.K. 2019. Evaluation of AquaCrop model simulations of cotton growth under deficit irrigation with an emphasis on root growth and water extraction patterns. Agricultural Water Management 213: 419-432.

25- Vanuytrecht E., Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E., Heng L.K., Garcia Vila M., and Mejias Moreno P. 2014. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. Environmental Modelling & Software 62: 351-360.

26- Wang F., Kang S., Du T., Li F., and Qiu R. 2011. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments. Agricultural Water Management 98: 1228-1238.

27- WRG (2030 Water Resources Group). 2009. Charting Our Water Future. The Barilla Group, The Coca-Cola Company, The International Finance Corporation, McKinsey & Company, Nestle S.A. Available from: http://www.2030 wrg.org/wp-content/uploads/2014/07/Charting-Our-Water- Future-Final.pdf

28- WWAP (World Water Assessment Programme), 2012. The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris, France. UNESCO. Available from: https://www.zaragoza.es/ contenidos/medio ambiente/onu// newsletter12/ 789-eng-sum-ed4.pdf

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 5, Dec.-Jan. 2021, p. 627-643

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۵، آذر – دی ۱۴۰۰، ص. ۶۴۳-۶۲۷

Simulation of Growth and Development of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under Drought Stress: 2- Simulation of Water Productivity, Above Ground Biomass and Yield

E. Farrokhi[1]- M. Nassiri Mahallati[2*]- A. Koocheki[3]- S.A. Beheshti[4]

Received: 27-09-2020
Accepted: 08-08-2021

Introduction: Predicting yield is increasingly important to optimize irrigation under limited available water to enhance sustainable production. Calibrated crop simulation models therefore increasingly are being used an alternative means for rapid assessment of water-limited crop yield over a wide range of environmental and management conditions. AquaCrop is a multi-crop model that simulates the water-limited yield of herbaceous crop types under different biophysical and management conditions. It requires a relatively small number of explicit and mostly-intuitive parameters to be defined compared to other crop models, and has been validated and applied successfully for multiple crop types across a wide range of environmental and agronomic setting. This study was conducted as a two-year field experiment with the aim of the simulation of water productivity, above ground biomass and fresh and dry yield of tomato using AquaCrop model under different irrigation regimes applied at two growth stages in Mashhad climate conditions.

Materials and Methods: A two-year field experiment was conducted during 2016-2017 growing seasons in the experimental field of Ferdowsi University of Mashhad located in Khorasan Razavi province, North East of Iran. The water-driven AquaCrop model developed by FAO was calibrated and validated to simulate water productivity, above-ground biomass and yield of tomato crop under varying irrigation regimes. AquaCrop was calibrated and validated for tomato under full (100% of water requirements) and deficit (75 and 50% of water requirements) irrigation regimes at vegetative (*100V*, *75V*, and *50V*) and reproductive stages (*100R*, *75R*, and *50R*). Model performance was evaluated in terms of the normalized root mean squared error (NRSME), the Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient (EF), Willmott's index of agreement (d) and coefficient of determination (R^2). The drip irrigation method was used for irrigation. The tomato water requirement was calculated using CROPWAT 8.0 software. The irrigation water was supplied based on total gross irrigation and obtained irrigation schedule of CROPWAT. The 2016 and 2017 measured data sets were used for calibration and validation of AquaCrop model, respectively.

Results and Discussion: Calibration results showed good agreement between simulated and observed data for water productivity in all treatments with high R^2 value (0.93), good ME (0.23), low estimation errors (RMSE=0.09 kgm^3) and high d value (0.85). The goodness of fit results showed that measured WP values were closer to simulated WP values for the validation season (2017) than for the calibration season (2016). During calibration, (2016), the model simulated the biomass with good accuracy. The simulated above ground biomass values were close to the observed values during calibration (2016) for all treatments with R^2 ranging from 0.92 to 0.99, NRMSE in range of 7.4 to 23%, d varying from 0.94 to 1, and ME ranging from 0.71 to 0.98. Validation results indicated good performance of model in simulating above ground biomass for most of the treatments ($0.92 < R^2 < 0.98$, $6.5\% < NRMSE < 21.3\%$, $0.76 < ME < 0.99$). During validation (2017 growing season), overall, the trend of biomass growth (or accumulation) was captured well by model. However, the range of biomass of simulation errors was high, especially in treatments with higher stress. Accurate simulation of the response of yield to water is important for agricultural production, especially in an arid region where agriculture depends closely heavily on irrigation. During validation, the model predicted dry and fresh yield satisfactorily (NRMSE = 15.64% and 11.80% for dry and fresh yield, respectively).

Conclusion: In general, the AquaCrop model was able to simulate the observed water productivity, above ground biomass and yield of tomato satisfactorily in both calibration and validation stage. However, the model performance was more accurate in non- and/or moderate stress conditions than in sever water-stress environments. In conclusion, the AquaCrop model could be calibrated to simulate growth and yield of tomato

1, 2 and 3- Ph.D. Candidate and Professors of Agrotechnology Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: mnassiri@um.ac.ir)
3- Associate Professor, Agriculture and Natural Resources Research Center Khorasan Razavi, Iran
DOI: 10.22067/JSW.2021.15035.0

under temperate condition, reasonably well, and become a very useful tool to support decision on when and how much irrigate. This study provides the first estimate of the soil and plant parameter values of AquaCrop for simulation of tomato growth in Iran. Model parameterization is site specific, and thus the applicability of key calibrated parameters must be tested under different climate, soil, variety, irrigation methods, and field management.

Keywords: AquaCrop model, Deficit irrigation, Modelling, Vegetative and reproductive stages, Water productivity